

В. Ю. Карасев, Е. С. Дзлиева, С. И. Павлов, Л. А. Новиков, И. А. Калинин

ОЦЕНКА ЗАРЯДА ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В УМЕРЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ*

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Предложен способ оценки заряда пылевой частицы, помещённой в магнитное поле. Рассматривается случай умеренных магнитных полей, когда электроны замагничены, а ионы нет. К задаче зарядки пылевой частицы в магнитном поле применены физические модели из теории зондов. Поток незамагниченных ионов рассчитан стандартным способом. В формуле для потока электронов учитывается их диффузия в магнитном поле. Выполненные численные оценки дают величину безразмерного заряда гранулы 1,4, в то время как в отсутствие магнитного поля заряд равен 2,2. Полученные оценки могут быть использованы при исследованиях пылевой плазмы в магнитном поле в отсутствие в настоящее время адекватной теории. Библиогр. 6 назв.

Ключевые слова: пылевая плазма, тлеющий разряд.

V. Yu. Karasev, E. S. Dzlieva, S. I. Pavlov, L. A. Novikov, I. A. Kalinin

ESTIMATION OF THE CHARGE OF DUST PARTICLES IN A MODERATE MAGNETIC FIELD

St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

The method of assessment of a charge of a dust particle placed in magnetic field is offered in present work. The case of moderate magnetic field when electrons are magnetized but ions are not magnetized is considered. Physical models from the theory of probes are applied to a problem of charging of the dust particle in magnetic field. The flux of ions is calculated in the standard way. The electron diffusion in magnetic field is considered in a formula for their flux. The executed numerical estimates give the value of a dimensionless charge of the granule 1,4 while for absence of magnetic field the charge is equal to 2,2. The received estimates can be used in researches of dust plasma in magnetic field in the absence of adequate theory. Refs 6.

Keywords: dusty plasma, glow discharge.

Согласно теории плазмы в магнитном поле [1], различаются диапазоны его воздействия на плазменные частицы. Слабым считается поле, в котором не замагничены электроны, в сильном магнитном поле замагничиваются даже ионы. Случай умеренных полей промежуточный, когда электроны замагничены, а ионы нет: $\omega_e \tau_e \gg 1$; $\omega_i \tau_i \ll 1$ (ω и τ циклотронные частоты и время между столкновениями ионов и электронов). Этот случай считается самым сложным в теориях плазмы и электростатического зонда. Поскольку концепция зарядки пылевой частицы в комплексной плазме [2] заимствована из теории зондов, то можно применить соответствующие физические модели к задаче зарядки пылевой частицы в магнитном поле.

В обсуждаемой теории в слабом и сильном магнитном поле выражения для потоков ионов и электронов определены как предельные случаи однозначно, в то время как в промежуточном случае они не установлены. В частности, для потока замагниченных электронов существует несколько подходов, их анализ содержится, например, в [3, 4]. В представляемой работе для оценки заряда зонда (частицы) мы применяем

* Работа поддержана РФФИ, грант № 14-02-00313.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2016

формулу потока электронов в магнитном поле, предложенную Ф. Ченом [4], а поток немагнитных ионов задаётся стандартным выражением

$$I_i = e\sqrt{8\pi}a^2n_i v_{T_i} \left(1 + \frac{eU}{kT_i}\right), \quad (1)$$

где e — элементарный заряд; a — радиус частицы; n_i — концентрация ионов; v_{T_i} — тепловая скорость ионов; T_i — температура ионов; U — потенциал поверхности частицы относительно плазмы; k — постоянная Больцмана.

Для стационарного случая потоки электронов и ионов равны, что даёт выражение для потенциала уединённого зонда (или пылевой частицы). Полученный потенциал далее пересчитывается в поверхностный заряд. Модель [4] применима при условиях, соответствующих экспериментам с комплексной плазмой.

В [4] было получено выражение для потока электронов

$$I_e = \frac{1}{3} en_e v_{T_e} S \frac{\lambda}{a} \sqrt{\frac{D_{\perp e}}{D_e}}, \quad (2)$$

где n_e — концентрация электронов; v_{T_e} — тепловая скорость электронов; S — собирающая поверхность; $D_{\perp e}$, D_e — коэффициенты диффузии; λ — длина свободного пробега.

Выражение (2) можно привести к удобному для пылевой плазмы виду и приравнять к выражению (1). Тогда в умеренном магнитном поле при условии замагнитненности электронов и немагнитненности ионов выражение для заряда пылевой частицы примет вид

$$Z = \frac{kT_i}{\sqrt{8\pi}eaV_{T_i}B}.$$

Выполненные численные оценки дают величину безразмерного заряда гранулы 1,4, в то время как в отсутствие магнитного поля заряд равен 2,2. Оценки оказываются в согласии с оценками, данными в [5], в соответствии с подходом, предложенным в [6], при котором в магнитном поле не изменяется плотность потока, а меняется только сечение захвата плазменных частиц.

Таким образом, альтернативные оценки заряда в слабом и умеренном магнитном поле качественно совпадают. Это позволяет использовать их при исследованиях пылевой плазмы в магнитном поле в отсутствие в настоящее время адекватной теории.

Литература

1. Чен Ф. Ф. Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987. 398 с.
2. Fortov V. E., Petrov O. F., Usachev A. D., Zobnin A. V. Micron-sized particle-charge measurements in an inductive rf gas-discharge plasma using gravity-driven probe grains // Phys. Rev. (E). 2004. Vol. 70. 046415.
3. Чан П., Талбот Л., Турия К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. М.: Мир, 1978. 197 с.
4. Чен Ф. Ф. Электрические зонды. М.: Мир, 1967. 202 с.
5. Дзмиева Е. С., Новиков Л. А., Павлов С. И., Карасев В. Ю. Об оценке заряда пылевых частиц в слабом магнитном поле // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 4. Физика. Химия. 2015. Т. 2 (60), вып. 4. С. 402–404.
6. Tsytovich V. N., Sato N., Morfill G. E. Note of the charging and spinning of dust particles in complex plasmas in a strong magnetic field // New J. Phys. 2003. Vol. 5. P. 43.1–43.9.

References

1. Chen F. F. *Vvedenie v fiziku plazmy* [*Vvedenie v fiziku plazmy*]. Moscow, Mir Publ., 1987. 398 p. (In Russian)
2. Fortov V. E., Petrov O. F., Usachev A. D., Zobnin A. V. Micron-sized particle-charge measurements in an inductive rf gas-discharge plasma using gravity-driven probe grains. *Phys. Rev. (E)*, 2004, vol. 70, 046415.
3. Chan P., Talbot L., Turian K. *Elektricheskie zondy v nepodvizhnoi i dvizhushcheisia plazme* [*Electric probe in stationary and moving plasma*]. Moscow, Mir Publ., 1978. 197 p. (In Russian)
4. Chen F. F. *Electric probes. Plasma diagnostic techniques*. New York, Academic Press, 1965. 200 p. [Russ. ed.: Chen F. F. *Elektricheskie zondy*. Moscow, Mir Publ., 1967. 202 p.]
5. Dzlueva E. S., Novikov L. A., Pavlov S. I., Karasev V. Yu. Ob otsenke zariada pylevykh chastits v slabom magnitnom pole [An estimate of the charge of dust particles in a weak magnetic field]. *Vestnik St. Petersburg University. Series 4. Physics. Chemistry*, 2015, vol. 2 (60), iss. 4, pp. 402–404. (In Russian)
6. Tsytovich V. N., Sato N., Morfill G. E. Note of the charging and spinning of dust particles in complex plasmas in a strong magnetic field. *New J. Phys.*, 2003, vol. 5, pp. 43.1–43.9.

Статья поступила в редакцию 4 октября 2016 г.

Контактная информация

Карасев Виктор Юрьевич — доктор физико-математических наук, профессор;
e-mail: plasmadust@yandex.ru

Дзлueva Елена Сослановна — кандидат физико-математических наук; e-mail: plasmadust@yandex.ru

Павлов Сергей Иванович — кандидат физико-математических наук; e-mail: plasmadust@yandex.ru

Новиков Леонтий Александрович — аспирант; e-mail: plasmadust@yandex.ru

Калинин Илья Андреевич — студент; e-mail: plasmadust@yandex.ru

Karasev Viktor Yurevitch — Doctor of Physics and Mathematics, Professor;
e-mail: plasmadust@yandex.ru

Dzlueva Elena Soslanovna — PhD; e-mail: plasmadust@yandex.ru

Pavlov Sergey Ivanovich — PhD; e-mail: plasmadust@yandex.ru

Novikov Leontyi Alexandrovich — post graduate student; e-mail: plasmadust@yandex.ru

Kalinin Il'ya Andreevich — student; e-mail: plasmadust@yandex.ru